

УДК 519.254+ 543.429.3+ 51-73

О.М. Поп, М.В. Стець, В.Т. Маслюк

Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017  
e-mail: oksana\_pop@i.ua

## МЕТОД СТАНДАРТНИХ МНОЖИН НУКЛІДІВ РЯДІВ $^{32}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ ТА ЙОГО ДЕЯКІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Розглядається метод стандартних множин нуклідів рядів  $^{32}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  визначення деяких часових параметрів зразків; основні проблеми гамма-спектрометрії слабких гамма-активностей нуклідів та шляхи їх вирішення. Твердження (висновки), які отримані в процесі розробки методу, використовуються як його логічний, з точки зору певної предметної експериментальної теорії, та метрологічний базиси.

**Ключові слова:** ряди  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ , гамма-спектрометрія, метод стандартних множин, впорядковані множини.

### Вступ

Метод стандартних множин нуклідів рядів  $^{32}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  розроблений для визначення деяких часових параметрів зразків (зокрема, дати можливих подій – змін нуклідного вмісту нуклідів). Для його реалізації потрібно виконати ряд метрологічних вимог, як до метода в цілому [1,2].

Відомо, що при виборі методу аналізу вирішальне значення мають його метрологічні характеристики. Метрологічні характеристики методу визначаються інтервалом визначуваних вмістів, правильністю, відтворюваністю, збіжністю. обов'язковими метрологічними характеристиками методу кількісних визначень мікроконцентрацій елементів є також нижня границя визначуваних вмістів, межа виявлення або межа визначення та інші.

Зараз можна виділити та розглянути із загальних міркувань деякі основні, на наш погляд, метрологічні характеристики методу стандартних множин нуклідів, які впливають на виміри, а саме фактори, які можуть бути джерелами (носіями) випадкових та систематичних похибок. Деякі інші з цих факторів розглянуто в [3–7].

### Метод стандартних множин нуклідів

Метод стандартних множин нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  ґрунтується на гамма-

спектрометричному визначенні нуклідів, позаяк потребує інформацію про активності (або про кількості ядер) бажано всіх нуклідів членів рядів:

ряд  $^{232}\text{Th}$ : МНС  $A^{232}\text{Th} = \{^{232}\text{Th}; ^{228}\text{Ra}; ^{228}\text{Ac}; ^{228}\text{Th}; ^{224}\text{Ra}; ^{220}\text{Rn}; ^{216}\text{Po}; ^{212}\text{Pb}; ^{212}\text{Bi}; ^{212}\text{Po}; ^{208}\text{Tl}\}$ ;

ряд  $^{235}\text{U}$ : МНС  $A^{235}\text{U} = \{^{235}\text{U}; ^{231}\text{Th}; ^{231}\text{Pa}; ^{227}\text{Ac}; ^{223}\text{Fr}; ^{227}\text{Th}; ^{223}\text{Ra}; ^{219}\text{At}; ^{219}\text{Rn}; ^{215}\text{Bi}; ^{215}\text{Po}; ^{215}\text{At}; ^{211}\text{Pb}; ^{211}\text{Bi}; ^{211}\text{Po}; ^{207}\text{Tl}\}$ ;

ряд  $^{238}\text{U}$ : МНС  $A^{238}\text{U} = \{^{238}\text{U}; ^{234}\text{Th}; ^{234\text{m}}\text{Pa}; ^{234}\text{Pa}; ^{234}\text{U}; ^{230}\text{Th}; ^{226}\text{Ra}; ^{222}\text{Rn}; ^{218}\text{Po}; ^{218}\text{At}; ^{214}\text{Pb}; ^{214}\text{Bi}; ^{210}\text{Tl}; ^{214}\text{Po}; ^{210}\text{Pb}; ^{210}\text{Bi}; ^{206}\text{Hg}; ^{210}\text{Po}; ^{206}\text{Tl}\}$ .

МНС  $A$  – модельний нуклідний спектр активностей. Гамма-активні нукліди (ГАН) виділені жирним шрифтом.

Метод стандартних множин з фізичної та практичної точки зору розглянуто в [3–7]. Зараз розглядаємо його суто як метод, що працює з впорядкованими множинами значень, які інтерпретуємо як макровеличини.

Розглядаємо впорядковані множини нуклідів рядів (сімейств)  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$ , на основі яких:

– розглядаються два типи кількісних характеристик впорядкованих множин нуклідів рядів: власне множини кількостей ядер цих нуклідів ряду та нуклідні спектри активностей – множини активностей цих нуклідів;

– розглядаються модельні (розрахункові) та експериментальні множини нуклідів;

модельні та експериментальні нуклідні спектри активностей нуклідів рядів;

- розглядаються, з врахуванням можливої події, модельні стандартні та нестандартні типи множин нуклідів; їх модельні: стандартні і нестандартні нуклідні спектри активностей;
- розглядаються експериментальні стандартні та нестандартні множини нуклідів;
- розглядаються їх експериментальні стандартні та нестандартні нуклідні спектри активностей;
- розглядаються, після прив'язки до умов експерименту, модельно-експериментальні стандартні множини кількостей нуклідів ряду, які теж назвемо стандартними множинами нуклідів;
- розглядаються модельно-експериментальні стандартні нуклідні спектри активностей, які теж назвемо стандартами [4–6].

*2.1. Інші характеристики методу стандартних множин.* Метод ґрунтується на відносному варіанті визначення вмістів, порівняння для різних геометрій та наближень (точкові джерела, об'ємні джерела) [8]. Він ґрунтується на вимірах природної гамма-активності зразків, тому у більшості практичних випадків ці виміри "низькофонові", тобто потребують роботи з слабкими сигналами, інтенсивність яких не більша, ніж інтенсивність фону. Нуклідний склад фонового гамма-випромінювання та гамма-випромінювання зразка практично один і той же – це випромінювання нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Цей факт суттєво ускладнює задачу [9].

Наш метод – це метод ядерних хронометрів, бо він включає у себе нуклідні пари. Його метрологічні можливості можуть бути порівняні з іншими методами ядерних хронометрів (стандартність і закритість) [10,11]. Метод стандартних множин оцінює значення дати події у вигляді проміжку (інтервалу) часу  $\Delta T_e = \{T_{e\max}, T_{e\min}\}$ . Це більш правильний підхід, оскільки враховується розкид значень активностей для всіх ГАН, і тому є більш стійким [4–6].

Метод стандартних множин оперує поняттями «стандартність/нестандартні-

сть»: метод дає змогу визначати закритість хімічної системи зразка. Інформацію про закритість / відкритість хімічної системи отримати на основі тільки двох гамма-активних нуклідів важко, або неможливо. Однак ця інформація про закритість / відкритість системи стає доступною у нашому методі, у якому ця інформація знаходиться у вигляді експериментальних нуклідних спектрів активностей. "Стандартність / нестандартність" (математичний аналог термінів «закритість / відкритість») ми у змозі оцінити [4–6].

Інформацію про "стандартність / нестандартність" можна використати для декомпозиції експериментального нуклідного спектра активностей, розкладаючи його на стандартні нуклідні спектри. Ці дані отримуються на основі обробки одного апаратурного гамма-спектра (АГС).

Візуалізація (спектралізація): використовуючи по можливості всі гамма-активні нукліди ряду, створюємо "багатоканальний" експериментальний нуклідний спектр, тобто робимо певну "візуалізацію" та "спектралізацію" списку активностей  $A$ .

*2.2. Аналіз проблематики методу стандартних множин* як методу свідчить, що основними проблемами є проблеми, пов'язані саме із складністю АГС. Однак це є типовими робочими проблемами сучасного гамма-спектрометричного комплексу. Тому зараз звернемо увагу лише на основне – проблему щільності інформації, яка призводить до інтерференцій.

АГС зразків отримуються на напівпровідниковому Ge (Li) – детекторі ДГДК-100В з роздільною здатністю 1,5 % для 1332 KeV  $^{60}\text{Co}$ , який є типовим детектором. Вказуємо на це, демонструючи (та перевіряючи) «невибагливість» методу. Тривалість експозиції виміру одного зразка складала 0,5–4 години. Зразки вимірювалися без якої-небудь спеціальної підготовки.

Отримання та первинна обробка апаратурних гамма-спектрів здійснюється на спектрометричному комплексі СЕГ-40-Ge, що складається з одноплатного

спектрометра SBS-40 фірми «GREEN STAR» (Росія) [12], призначеного, зокрема, для роботи з типовими та надійними Ge(Li) - детекторами ДГДК-100В, якими користуємось. Цей комерційний комплекс, який в подальшому будемо йменувати SBS-40, включає в себе програмне забезпечення – інтегрований пакет програм, які, окрім іншого, працюють у діапазоні енергій гамма-квантів від 0 KeV; добре виявляють піки в апаратурних гамма-спектрах, у широкому діапазоні реальних значень роздільної здатності; розділяють мультиплети (кратність мультиплетів до 20 піків) тощо. SBS-40 ідентифікує піки як лінії ГАН; ідентифікує ГАН. Це реалізоване при умові, якщо площа піка  $\Delta S$  більша "трьох коренів квадратних з фону  $F$ ":  $\Delta S \geq 3\sqrt{F}$ ; (фон  $F$  – п'єдестал під піком) [15].

Зрозуміло, що ця статистична умова  $\Delta S \geq 3\sqrt{F}$  виконується не завжди, зокрема в області енергій гамма-квантів менше

100 KeV, де відбувається різкий спад ефективності реєстрації гамма-квантів напівпровідниковим детектором. Тому, коли для деяких нуклідів програма не реєструє потрібні лінії, виникає потреба збільшення тривалості вимірів. Є й інша можливість. Маючи список ліній, що представляють інтерес, SBS-40 дозволяє шукати пік у потрібному місці АГС "вручну". Це означає, що SBS-40 вже вважає шуканий пік лінією. У цих випадках критерій "трьох коренів квадратних" не «включено», і можна шукати слабкі піки (активності).

У процесі обробки даних спектрометрії формується список ліній інтересу (див. табл.1). У колонці під «№» вказаний рейтинг лінії ГАН (рейтинг – порядковий номер у впорядкованій від «більшого до меншого» послідовності квантових виходів ліній одного ГАН).

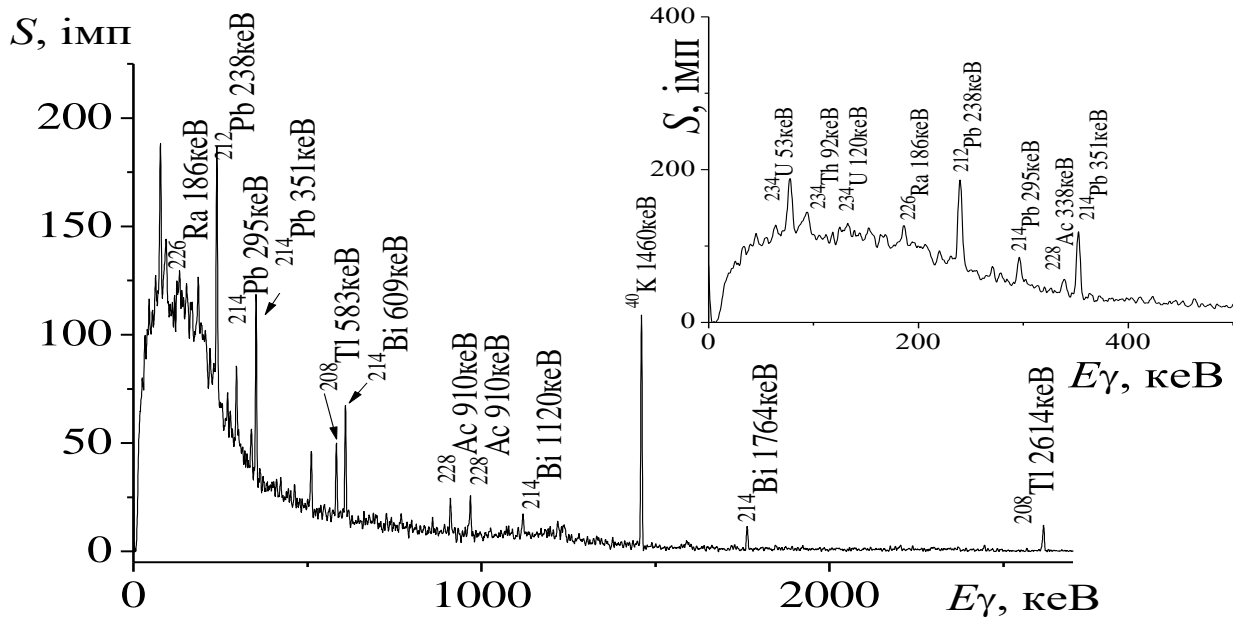


Рис. 1. Типовий апаратний гамма-спектр природної активності зразка. Позначені основні лінії основних нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

Таблиця 1.

Список ліній інтересу в рядах  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  [13]

| ГАН               | E,KeV   | № | n, %  | E,KeV  | № | n, % | E,KeV  | № | n, %  | E,KeV | № | n, % |
|-------------------|---------|---|-------|--------|---|------|--------|---|-------|-------|---|------|
| $^{232}\text{Th}$ | 63,81   | 2 | 0,263 | 140,88 | 3 | 0,02 |        |   |       |       |   |      |
| $^{228}\text{Ac}$ | 338,32  | 4 | 11,27 | 911,20 | 2 | 25,8 | 968,97 | 3 | 15,8  |       |   |      |
| $^{228}\text{Th}$ | 84,373  | 2 | 1,22  | 215,98 | 3 | 0,25 | 131,61 | 4 | 0,130 |       |   |      |
| $^{224}\text{Ra}$ | 240,986 | 1 | 4,1   |        |   |      |        |   |       |       |   |      |
| $^{212}\text{Pb}$ | 238,632 | 1 | 43,6  | 300,08 | 6 | 3,3  |        |   |       |       |   |      |
| $^{212}\text{Bi}$ | 727,33  | 2 | 6,67  |        |   |      |        |   |       |       |   |      |

|                    |         |   |       |        |   |      |        |   |       |         |   |      |
|--------------------|---------|---|-------|--------|---|------|--------|---|-------|---------|---|------|
| <sup>208</sup> Tl  | 583,191 | 2 | 84,5  | 2614,5 | 1 | 99,1 |        |   |       |         |   |      |
| <sup>235</sup> U   | 143,76  | 3 | 10,96 | 163,33 | 5 | 5,08 | 185,71 | 1 | 57,2  | 205,311 | 6 | 5,01 |
| <sup>231</sup> Th  | 84,21   | 3 | 6,6   | 25,64  | 2 | 14,1 |        |   |       |         |   |      |
| <sup>231</sup> Pa  | 27,36   | 2 | 10,3  | 302,65 | 4 | 2,2  |        |   |       |         |   |      |
| <sup>227</sup> Ac  | 86,105  | 2 | 0,002 | 99,6   | 3 | 0,00 | 160,49 | 4 | 0,004 |         |   |      |
| <sup>227</sup> Th  | 235,96  | 1 | 17,5  | 256,23 | 3 | 9,5  | 329,85 | 4 | 4     |         |   |      |
| <sup>238</sup> U   | 49,55   | 2 | 0,064 | 113,5  | 3 | 0,01 |        |   |       |         |   |      |
| <sup>234</sup> Th  | 63,29   | 2 | 4,8   | 92,38  | 3 | 2,8  |        |   |       |         |   |      |
| <sup>234m</sup> Pa | 1001,03 | 1 | 0,836 | 766,36 | 3 | 0,29 | 111,29 | 8 | 0,053 | 258,26  | 7 | 0,07 |
| <sup>234</sup> Pa  | 926,72  | 9 | 7,2   | 946    | 4 | 13,4 |        |   |       |         |   |      |
| <sup>234</sup> U   | 53,2    | 2 | 0,123 | 120,9  | 3 | 0,04 |        |   |       |         |   |      |
| <sup>230</sup> Th  | 67,672  | 2 | 0,38  | 253,5  | 4 | 0,01 | 143,76 | 3 | 0,049 |         |   |      |
| <sup>226</sup> Ra  | 186,211 | 2 | 3,59  |        |   |      |        |   |       |         |   |      |
| <sup>214</sup> Pb  | 241,997 | 5 | 7,43  | 295    | 2 | 19,3 | 351    | 1 | 37,6  |         |   |      |
| <sup>214</sup> Bi  | 609,312 | 1 | 46,1  | 768,35 | 6 | 4,94 | 1120,2 | 3 | 15,1  | 1764,49 | 2 | 15,4 |
| <sup>210</sup> Pb  | 46,539  | 2 | 4,25  |        |   |      |        |   |       |         |   |      |

*n* – квантовий вихід [13]. Сірим кольором виділено лінії з енергією гамма-квантів менше 100 кеВ.

Загалом у кожному апаратурному гамма-спектрі шукається понад 50 ліній. Формально кожна з цих ліній інтерферує – має інтерферентів [14]. Видно, що щільність ліній, необхідних для визначення множин нуклідів, велика.

**2.3. Інтерференції.** Інтерференція залежить від багатьох факторів, в першу чергу від вмісту ГАН у зразку. Але, як правило, вміст ГАН невідомий, або відомий частково. Тому розгляд та врахування інтерференцій повинен, на наш погляд, здійснюватися тільки у разі крайньої необхідності. Відмітимо, що в апаратурних гамма-спектрах час від часу з'являються рентгенівські лінії.

Ймовірність утворення ліній – каскадних та випадкових сум інших ліній – для наших активностей невисока і не враховувалась. Однак моніторинг за їх можливим утворенням здійснювався в області значень енергій сум цих ліній. Це стосується і ліній – піків одиночного (single escape) та подвійного (double escape) вильоту для енергій гамма-квантів більше 1022KeВ. Зрозуміло, що всі ці лінії теж повинні виявлятися. Список ліній інтересу повинен виражати можливість вирішення задачі та давати оцінку можливостей методики. Отже, ідентифікація та подальший розгляд інтерференцій – це складна, але типова задача ядерної гамма-спектрометрії (ЯГС). Маючи певний досвід вирішення проблем такого типу, можна

стверджувати, що проблеми слабких сигналів та інтерференцій у більшості випадків не є невіршуваними. У кожному конкретному випадку існує алгоритм елімінації (однак не повної) інтерференцій.

У процесі розробки та апробації методу стандартних множин були досліджені та адаптовані деякі відносно нові методи математичної обробки даних. Зауважимо, що всі можливості цих та деяких інших методів нами ще не використані.

**2.4.1. Бутстреп.** Нехай А, В, С, Д – стартові апаратурні гамма-спектри. Тривалість виміру кожного з них *ТС*. Тоді їх комбінаторні суми: АВ=А+В, АС=А+С,..., АСД=А+С+Д, і т.д. можна розглядати як нові додаткові АГС – додаткові виміри з тривалістю виміру *2ТС*; *3ТС*; максимальною тривалістю – *4ТС*. Таким чином, можна комбінаторно отримати множину АГС, маючи певну обмежену кількість «стартових» АГС [15,16]. Ця технологія збільшення АГС є відомою і звичною у практиці ядерної гамма-спектрометрії, і, по своїй суті, є бутстрепом, який називаємо комбінаторним бутстрепом. У цій додатковій множині АГС здійснюється пошук потрібних піків. Таким чином, використовуємо такі властивості ліній в АГС, як самоподібність (кожен пік має трійку значень «мінімум-максимум-мінімум»), та інваріантність, збільшуючи

надійність процедур обробки слабких сигналів.

Окрім комбінаторного бутстрепа, було використане також і класичне розмноження вибірок – прямий бутстреп. Не деталізуючи, вкажемо, що бутстреп-технології збільшують впевненість та надійність виявлення слабких піків; зменшують середню похибку (незважаючи на те, що зростає відносний вклад вимірів з невеликими значеннями тривалостей вимірів, і тому систематична похибка при зменшенні тривалості вимірів буде зростати); дають спосіб виявлення промахів. Детальніше проблематика та можливості бутстреп-методів розглянуті в [15,16].

2.4.2. *Фур'є-фільтрація* з використанням швидкого прямого та оберненого перетворення Фур'є дозволяє згладити «високочастотні» шуми та більш надійно виділити й ідентифікувати пік, при збереженні його форми та площі. Фур'є-фільтрація конкатенованих апаратурних гамма-спектрів (або певних їх ділянок, наприклад в області низьких енергій). У деяких випадках, коли площа піків мала ( $\Delta S \leq 10$ ), здійснюємо конкатенацію ЗАГС; БАГС; 9АГС – створення послідовності АГС: "початок-кінець" & "початок-кінець"& ...; де &– знак конкатенації. Цей новий спектрометричний об'єкт, в якому зросла ймовірність виявлення піків, бо зросла частота їх невинуваткової появи, оброблявся як АГС. Проблематика та можливості Фур'є-, та Вейвлет-фільтрів для виявлення слабких сигналів розглянуті в [15].

2.5. *Логічний та метрологічний базис методу стандартних множин.* Наш метод базується на деяких важливих твердженнях, які можна розглядати як робочі гіпотези. Ці твердження, логічні наслідки із цих тверджень та їх правильність є логічним та метрологічним базисом методу стандартних множин, бо входять до аксіоматичного базису метрології будь-якого методу вимірювання – метрії [1,17]. Помилковість деяких з них може призвести до систематичних похибок, які звужують коло вирішуваних проблем. Тому доказ істинності цих гіпотез є нашою важливою задачею. Приведемо основні

метрологічні твердження, отримані в результаті ретельного аналізу алгоритму методу.

*Твердження про стандартну множину.* Розглядаємо термін «стандартна множина нуклідів», хоч його семантика, в нашому контексті, близька до семантики терміну «ряд». Однак термін «стандартна множина нуклідів» є іменем конкретної, реально існуючої емпіричної структури величин, котра сама є фізичною величиною і може бути визначена (виміряна).

*Твердження про причину появи нових стандартних множин.* Подія і нова (дочірна) стандартна множина. Приймаємо, що подія призводить до утворення нових дочірніх стандартних множин нуклідів – це і є подія. Нові дочірні множини – тільки стандартні множини, інші не утворюються.

*Твердження про еквівалентність понять "геохімічні умови "закритості системи"" і "математичні умови "стандартності множини нуклідів"".* Приймаємо еквівалентність понять "геохімічні умови "закритості системи"" і "математичні умови "стандартності множини нуклідів"".

Приймаємо *твердження про еквівалентність (взаємну однорідність) експериментального та модельного нуклідних спектрів*, позаяк в експериментальному і модельному нуклідних спектрах використовуємо основні закони радіоактивного розпаду.

Приймаємо *твердження про еквівалентність (взаємну однорідність) величини і стандарту (міри).*

*Твердження про іманентний (внутрішній) математичний еталон (стандарт) зразка. Таблиця стандартів (модельних нуклідних спектрів активностей), розрахована для всіх радіонуклідів ряду, виконує функцію іманентного (внутрішнього) математичного еталону (стандарту) зразка.*

*Твердження про можливість вимірювання експериментальних нуклідних спектрів:* експериментальні і стандартні модельні нуклідні спектри можна порівнювати між собою. Цим здійснюється вимірювання. У методі маємо змогу

порівнювати два спектри нуклідів – експериментальний спектр і стандартний (модельний) спектр. Це порівняння дозволяє твердити про "стандартність / нестандартність" експериментального спектра (і, відповідно, його експериментальної множини). Отже, можна стверджувати, що ми вимірюємо: "стандартність", "закритість" системи (зразка).

*Твердження про композицію.* Ми показуємо, що експериментальна множина нуклідів – це композиція стандартних множин.

*Твердження про можливість декомпозиції* експериментальної множини. Експериментальну множину нуклідів можна розкласти на стандартні множини.

*Твердження про вирішення проблеми врахування поправок внаслідок відкритості системи.* Декомпозиція експериментальної множини на стандартні множини вирішує невизначеності, пов'язані з необхідністю врахування поправок на вмісти нуклідів внаслідок відкритості системи.

*Твердження про можливість виміру часу.* Можливість виміру часової

координати експериментального, та модельного нуклідних спектрів у таблиці стандартів означає, що ми можемо визначати тривалість існування стандартної множини, тобто дату події, коли ця стандартна множина з'являється.

### Висновки

Зроблена спроба розгляду методу стандартних множин нуклідів не лише як методу вимірювань, але і як невеликої, проте цілком самостійної певної предметної експериментальної теорії.

Встановлено, що такий розгляд є не тільки можливим, але, на наш погляд, необхідним: новий метод вимірювання, окрім необхідності вирішувати власні проблеми, потребує також і розробки його, як певної предметної експериментальної теорії, із власним логічним та метрологічним базисом [1,17] – основними поняттями, термінами, та величинами, якими цей метод у подальшому оперує. Цей базис, на наш погляд, буде важливою компонентою логічних та метрологічних характеристик методу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Часть первая. Общая теория измерений. 4-е издание. - СПб.: «Питер», 2010. – 192 с.
2. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. - М.: «Из-во стандартов», 1991. – 228 с.
3. Поп О.М., Стець М.В. Модели еволюції множин радіоактивних нуклідів рядів торію 232, урану 235, урану 238, та їх застосування // Доповіді Національної Академії Наук. – № 4 – 2013 – С. 65-71.
4. Поп О.М., Пеняк П.С., Стець М.В. Метод стандартних множин та метод ізохрон для визначення подій у зразках кераміки // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2013 – С. 101 – 108.
5. Стець М.В., Поп О.М., Сіксаї Л.Т., Сірчак Є.С. Гамма-спектрометрія крові людини в післячорнобильський період. Визначення часу // Науковий Вісник Ужгородського університету. Сер. Хімія. – № 2 (30). – 2013 – С. 89-95.
6. Поп О.М., Стець М.В., Маслюк В.Т., Мацків Б.В., Хомутник Р.В. Нуклідні спектри гамма-активностей рядів торія і урана, та їх використання в спектрометрії зразків гірських порід // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – Вип. 36. – 2014 – С. 89-95.
7. Pop O.M., Stets M.V. Standard sets of nuclides being the members of the  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series. Their identification and use // Тезиси докладов 64 Международной конференции «ЯДРО-2014» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (Минск, 1–4 июля 2014 года). – 2014. – С. 240.
8. Поп О.М., Стець М.В. Експериментальне визначення метрологічних коефіцієнтів ядерної гамма-спектрометрії об'ємних зразків

- // Науковий Вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика. – Вип. 28. – 2010 – С. 93-98.
9. Юркуц Ю.Ю., Поп О.М., Стець М.В., Маслюк В.Т. Система стабілізації та пониження фону в гамма-спектрометричному комплексі // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2011. – Вип. 30. – С. 188-196.
  10. Фор Г. Основы изотопной геологии. – М.: Мир, 1989. – 590 с.
  11. Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 543 с.
  12. [www.greenstar.ru](http://www.greenstar.ru)
  13. Table of Isotopes CD-ROM, 8 Edition, Version 1.0 / By Richard B. Firestone, 1996.
  14. Поп О.М. Часова залежність інтерференцій аналітичних ліній радіоактивних нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2012. – Вип. 32. – С. 45-50.
  15. Поп О.М. Використання Фур'є-, Вейвлет-фільтрації та бутстреп-метод при обробці слабких піків в апаратурних гамма-спектрах // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2014. – Вип. 35. – С. 150-156.
  16. Поп О.М., Стець М.В., Маслюк В.Т. Прямий та обернений бутстреп-методи в задачах обробки даних ядерної гамма-спектрометрії зразків кераміки // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Хімія. – 2014. – Вип. 32 (2). – С. 98-101.
  17. Дж.Шенфилд. Математическая логика. – М.: «Наука», 1974. – 528 с.

Стаття надійшла до редакції 02.07.2015

О.М. Поп, М.В. Стець, В.Т. Маслюк

Институт электронной физики НАН Украины, ул. Университетская, 21, Ужгород, 88017

## МЕТОД СТАНДАРТНЫХ МНОЖЕСТВ НУКЛИДОВ РЯДОВ $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , И ЕГО НЕКОТОРЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассматривается метод стандартных множеств нуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  определения некоторых временных параметров образцов; основные проблемы гамма-спектрометрии слабых гамма-активностей радионуклидов, и пути их решения. Утверждения (выводы), полученные в процессе разработки метода, используются как его логический, с точки зрения определенной предметной экспериментальной теории, и метрологический базисы.

**Ключевые слова:** ряды  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ , гамма-спектрометрия, метод стандартных множеств, упорядоченные множества.

O.M. Pop, M.V. Stec, V.T. Maslyuk

Institute of Electron Physics, Ukr.Nat.Acad.Sci., University Str., 21, Uzhhorod, 88017

## **METHOD OF STANDARD NUCLIDE SETS OF $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ SERIES, AND ITS SOME METROLOGICAL CHARACTERISTICS**

This paper considers the method of standard nuclide sets of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series determining of some time parametres of samples; the basic problems of gamma-spectrometry of weak radionuclide gamma-activity, and ways of their decision. Statement (conclusions) received in the process of developing a method, it is used as a logical from the standpoint of a particular subject experimental theory and metrological bases.

**Keywords:**  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series, method of standard sets, gamma-spectrometry ordered sets.